

(21) Aktenzeichen: 195 31 802.1
(22) Anmeldetag: 30. 8. 95
(43) Offenlegungstag: 6. 3. 97

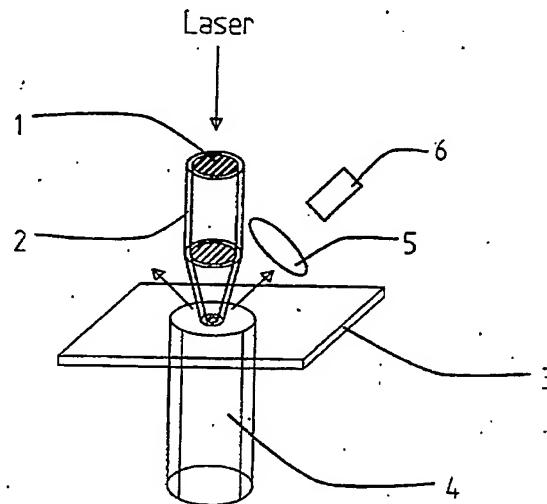
(71) Anmelder:
Gutroff, Günter, 97996 Niederstetten, DE

(72) Erfinder:
gleich Anmelder
(56) Entgegenhaltungen:
US 53 04 795
US 52 94 790
EP 06 22 652 A1
WO 91 06 884 A1
J. Appl. Phys. 75 (10), 6872-6877, 1994;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Verfahren zur Steigerung des optischen Auflösungsvermögens

(57) Das Auflösungsvermögen von konventionellen optischen Instrumenten ist im allgemeinen durch die Lichtwellenlänge limitiert. Eine neue Art der optischen Mikroskopie benutzt extrem kleine Lichtquellen, um Oberflächen "abzuscannen". Ein Feedback sorgt dafür, daß der Abstand der Lichtquelle zur Oberfläche konstant (im Bereich von 10 nm) gehalten wird. Herkömmliche Feedbacks sind bezüglich der Geschwindigkeit und des Anwendungsspektrums prinzipiell beschränkt.
In eine zugespitzte Glasfaser (1), die von einer Metallschicht (2) ummantelt wurde, wird Licht eines Lasers gekoppelt. Am Ende dieser Faser entsteht eine Lichtquelle mit einem Durchmesser < 50 nm. Während die Glasfaser über eine Oberfläche (3) bewegt wird, mißt ein Detektor (6) die Intensität $I(z)$ des reflektierten Lichtes. Die funktionale Abhängigkeit $I(z)$ wird ausgenutzt, um einen Feedback zu konstruieren, der $I(z)$ konstant hält, so daß die Lichtquelle den sogenannten Nahfeldinterferenzbereich nicht verläßt. Ein prinzipielles Geschwindigkeitslimit dieses Feedbacks besteht nicht, deshalb eignet sich dieses Verfahren besonders für optische Mikroskopie im Auflösungsbereich weit unterhalb der Lichtwellenlänge bzw. für die Datenspeicherung.



Beschreibung

Das Auflösungsvermögen von optischen Instrumenten ist im Allgemeinen durch die Wellenlänge λ des verwendeten Lichtes begrenzt. Dies führt dazu, daß mit konventionellen optischen Mikroskopen, die mit sichtbarem Licht arbeiten ($400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$), ein maximales Auflösungsvermögen von ca. $1 \mu\text{m}$ erreicht wird. Die Speicherdiichte von Magneto-optischen Datenspeichern (Scientific American 8/95, Seite 31), die einen Laser in Kombination mit einem Linsensystem verwenden, ist demzufolge ebenfalls auf dieses räumliche Auflösungsvermögen limitiert.

Fortschritte der letzten Zeit in der Scanning Probe Microscopy (SPM), ein Forschungsgebiet, das von der Raster-Tunnel-Mikroskopie (RTM) (siehe Physical Review Letters 50, 120 (1983) G. Binnig, Ch. Gerber, E. Weibel, H. Rohrer) geboren wurde, haben dazu geführt, daß auch das Auflösungsvermögen in der Mikroskopie mit sichtbarem Licht extrem gesteigert wurde.

RTM kann Atome "sichtbar" machen, hat also Auflösungen im sub Å Bereich. Für eine Vielzahl von Anwendungen wie z. B. Untersuchung von biologischen Materialien, Halbleiterstrukturen, insbesondere von optoelektronischen Bauelementen eignet sich aber besonders sichtbares Licht.

Scanning Near Field Optical Microscopy (SNOM) funktioniert grob nach folgendem Prinzip:
(siehe Science 257, 189 (1992); General description of SNOM; E. Betzig and J.K. Trautman)
(siehe Science 264, 264 pp. 1740–1745 June 1994; Near-Field Spectroscopy of a Luminescent System; H.F. Hess, E. Betzig, T.D. Harris...)
(siehe Journal Applied Physics 73 (3) 1 February 1993 : Resolution in collection mode scanning optical microscopy; E.L. Buckland, P.J. Moyer and M.A. Paesler)

(Abb. 1a)

Eine extrem klein dimensionierte Lichtquelle (Probe) (1) wird mit Hilfe eines Piezo Scanning Systems (3) über eine beliebige Oberfläche (Sample) (2) bewegt.

Die Darstellung der Lichtquelle ist durch verschiedene Methoden realisierbar, was aber für das elementare Funktionsprinzip des SNOMs unerheblich ist.

Für jeden Punkt $p(x,y)$ wird die Intensität des reflektierten und/oder transmittierten Lichtes mittels eines Lichtkollektionssystems (4) und Detektors (5) gemessen, man erhält also ein Intensitätsprofil $I(x,y)$ im Reflexions- und/oder Transmissionsmodus. Des weiteren ist es möglich, indem man einen Spektrometer parallel zu Detektor "anschließt", ein Spektroskopieprofil $I(x,y,\lambda)$ einer Oberfläche zu erstellen.

Verschiedene Methoden der Darstellung der Lichtquelle:

(a)

Halbleiterlaser können bereits in Dimensionen von 100 nm hergestellt werden. Man verwendet zum Teil direkt solche Halbleiterlaser als Lichtquelle zum Scannen.

(b) (Abb. 1b)

Es ist möglich Glasfaser herzustellen deren Ende konsisch auf eine Kreisfläche mit einem Durchmesser unterhalb von ca. 50 nm zuläuft (1). Koppelt man kohärentes Licht eines Laser in diese Glasfaser, die zuvor noch von einer lichtundurchlässigen Metallschicht (2) beschichtet wurde, so wird das Laserlicht am Ende der Faser auf eine Querschnittsfläche mit einem Durchmesser unterhalb von 50 nm "komprimiert", folglich hat man eine Lichtquelle, deren Dimension weit unterhalb

der Wellenlänge des verwendeten Lichtes liegt.

Das Kernproblem allgemein in der Scanning Probe Microscopy SPM ebenso in der Scanning Near Field Optical Microscopy ist, einen Feedback (Rückkopplungsmechanismus) zu finden, der einen konstanten Abstand von Probe und Sample garantiert. Berechnungen und Experimente zeigen:

Die Probe (d. h. die Lichtquelle) muß bis zu einem Abstand von ca. 10–100 nm an die Sample gebracht werden damit man ein günstiges optisches Nahfeld erhält, was letztendlich in einem guten Auflösungsvermögen resultiert.

Um dies zu verwirklichen benutzt man zur Zeit Feedbacks die schon für Atomic Force Microscopy (AFM) und RTM entwickelt wurden und nicht auf spezielle Eigenschaften des optischen Nahfeldes basieren.

Kurze Erläuterung dieser Feedbacks:

– Atomic Force Feedback:

In diesem Falle wird die Glasfaserspitze aus (b) zum Schwingen mit einer bestimmten Frequenz angeregt, bringt man nun diese oszillierende Glasfaserspitze in die Nähe von Atomen, so verändert sich diese Oszillationsfrequenz. Exakt dieser, bisher noch ungeklärte Effekt wird zur Konstruktion eines Feedbacks benutzt.

– RTM Feedback:

(siehe: Applied Physics Letters: 62 (12), 22 March 1993: "Simultaneous Scanning tunneling and Optical Near-Field imaging with a micropipette" Authors: Klony Lieberman, Aaron Lewis)

Diese Techniken markieren den aktuellen Stand der Technik.

Nachteile dieser Feedbacks liegen v.a. in der niedrigen Scan-Geschwindigkeit was eine geringe "Bildwiederholrate" der Mikroskope, die nach diesen Methoden arbeiten, zur Folge hat. Des weiteren sind zum Teil sehr eingeschränkt anwendbar und weitaus aufwendiger und kostenintensiver.

Neuartiger Feedback, für den der Patentschutz beantragt wird:

Beschreibung der mechanischen Anordnung (Abb. 2): Tube Scanner (3) haben im Normalfall einen "Scanbereich" in x,y,z-Richtung von einigen μm .

Mit Hilfe einer x,y,z Positionierungsplattform (1) wird deswegen der Tube Scanner (3) mit dem Sample (4) zuerst "grob" bis auf eine Entfernung z kleiner als $1 \mu\text{m}$ an die Glasfaserspitze (6) "herangefahren". Das Sample ist mittels einer Halterung (2) an die Positionierungsplattform befestigt, ebenso das Sample auf dem Tube Scanner. Die Kollektionsglasfaser (7) sind symmetrisch um die Glasfaserspitze (6) angeordnet, der Winkel α zwischen (6) und (7) beträgt jeweils 45° .

(6) und (7) werden mit Hilfe einer speziellen Halterung (5) präzise positioniert, so daß die imaginären Achsen der Kollektionsglasfasern (7) die Spitze von (6) schneiden. Der Abstand zu diesen Fokuspunkt kann entsprechend der numerischen Apertur dieser Glasfasern gewählt werden.

Zusammenfassend gesagt wird also jeweils ein Ende der Kollektionsfaser (7) und die Spitze der Glasfaser (6) von der Halterung (5) eingespannt, die jeweiligen anderen Enden können, wie im Nachfolgenden beschrieben, an anderen optischen Geräten angeschlossen werden.

Schematischer Aufbau (Abb. 3)

Ein Computer mit Digital/Analog- und Analog/Digital-Wandler kontrolliert mittels verschiedener analoger und digitaler Ausgangssignale (Abb. 3, (x1, y1, z1), (2),

(3)), die mit einem Hochspannungsverstärker entsprechend verstärkt werden, einerseits die Positionierungsplattform (Verstärkerausgangssignale (Abb. 3, (x2, y2, z2)) und andererseits die Position des Tube Scanners (Verstärkerausgangssignale (Abb. 3, (x3, y3, z3))). Das Licht eines Lasers gelangt mittels eines Laser-Glasfaserkopplers über das andere Ende der Eingangsglasfaser (Abb. 3, (4)) bis zu deren Spitze (Abb. 2, (6)). Die anderen Enden der Kollektionsglasfasern (Abb. 2, (7)) (Abb. 3, (5)) werden je nach Bedarf an Photodioden und Spektrometer und evtl. an andere Detektoren (Abb. 3, (11)) angeschlossen.

Der Computer erhält zwecks Steuerung und Datenaufnahme über einen A/D-Wandler Signale vom Spektrometer (8) und der Photodiode (7). Beide Detektoren sind parallel über die Kollektionsglasfaser (5) an das SNOM angeschlossen. Der Spektrometer benötigt dabei geeignete Lichtfilter, das Ausgangssignal der Photodiode muß noch für die A/D-Karte des Computers entsprechend verstärkt werden.

Funktionsweise: (Abb. 3)

Die elementare Funktionsweise des Feedbacks basiert auf der Abhängigkeit der Intensität des reflektierten Lichtes I von der Entfernung Probe-Sample z. Diese Funktion I(z) hängt zwar von der Art des Samples und der Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes ab, topologisch erhält man aber einen typischen Kurvenverlauf I(z) wie in (Abb. 6) gezeigt. Die x-Achse des Graphen entspricht dem Abstand z von Probe-Sample, die y-Achse der Intensität I.

Grob kann man diesen Verlauf in zwei Bereiche einteilen:

- Bereich (a) : optische Nahfeldinterferenz,

$$z < \frac{\lambda}{2 \cdot \cos \alpha}; \alpha = 45^\circ \Rightarrow z < \frac{\lambda}{\sqrt{2}}$$

- Bereich (b) : optische Fernfeldinterferenz, $z > \lambda$.

Bei der Grobpositionierung des Tube Scanners steuert der Computer gleichzeitig die Positionierungsplattform (Abb. 2 (1)) bzw. das Scanning System (Abb. 2 (3)) und liest das Ausgangssignal der Photodiode, das proportional zu I(z) ist. Durch Vergleich mit der Referenzkurve (Abb. 6) ist es somit möglich das optische Nahfeld zu "finden" und einen Abstand Sample-Probe $z < \lambda < 1 \mu\text{m}$ zu erreichen. Anschließend wird im optischen Nahfeld eine Referenzintensität I_R definiert und der Scanprozeß gestartet. Der Computer gibt die Signale zum Abscannen eines bestimmten Bereichs (x,y).

Die Nahfeldabhängigkeit von I(z) (siehe Referenzkurve (Abb. 6)) wird zur Konstruktion des Feedbacks verwendet, für den der Patentschutz beantragt wird.

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, den Feedback mit Hilfe von Analog- (Abb. 3, Option (6), (10), (9)) oder Digitalelektronik (Abb. 3, Signal (7)) zu steuern: Eine digitale Lösungsvariante des Problems ist:

Der folgende Algorithmus in Pseudo-Code für den Feedback wird für jeden Punkt (x,y) des Scanbereichs durchlaufen:

Definitionen:

- $I = I(x, y, z)$: vom Computer eingelesenes Intensitätsignal von der Photodiode (Abb. 3, Signal (7)).
- V: vom Computer ausgegebenes Signal zum Hochspannungsverstärker zur Steuerung der z-Ausdehnung des Tube Scanners. Die z-Ausdehnung sei dabei proportional zu V. (Abb. 3, Signal (z 1), (z2))
- dl: vom Benutzer definierter Toleranzbereich für die Intensität I
- Nulldurchlauf = 1: vorher gelesenes Intensitätsignal war kleiner als das Referenzsignal I_R und momentane Intensität ist größer. Oder genau umgekehrt.
- Zustand = 0: Feedback ist aktiv
- Zustand = 1: Feedback ist fertig
- Abs(x): absoluter Wert von x

```

FUNCTION Feedback(Vstart, IR);
BEGIN
 20 Zustand := 0;
 V := Vstart;
 Lese I;
 WHILE (Zustand = 0) DO
 BEGIN
 25 IF ((Nulldurchlauf = 1) OR (Abs(I - IR) < dl)) THEN
 Zustand := 1;
 ELSE BEGIN
 IF (I < IR) THEN erniedrige V;
 IF (I > IR) THEN erhöhe V;
 30 Lese I;
 END;
 END;
 Feedback := V;
 END;
 35 Die beiden Anweisungen:
 IF (I < IR) THEN erniedrige V;
 IF (I > IR) THEN erhöhe V;

```

machen dabei von der funktionalen Abhängigkeit der Nahfeldinterferenz I(z) (Abb. 4, Bereich (a)) gebraucht, d.h. ist die Intensität I zu groß, so muß der Abstand Probe-Sample verkleinert bzw. die z-Ausdehnung und die Spannung V der Scanning Tube vergrößert werden. Und genau umgekehrt.

Der Algorithmus gibt für jeden Punkt (x,y) des Scanbereichs den Wert der Spannung V aus, der gespeichert wird. Folglich erhält man ein Profil der konstanten Reflexionsintensität der Oberfläche $V_R(x,y)$.

Schließt man parallel zur Photodiode an eine andere Kollektionsglasfaser ein Spektrometer an, so erhält man zusätzlich ein Spektrum für jeden Punkt (x,y) des Scanbereichs $I(x,y,\lambda)$.

Besondere Vorteile der Erfindung liegen v.a. in der Geschwindigkeit. Die in (2.2.1) und (2.2.2) beschrieben Feedbacks sind diesbezüglich prinzipiell limitiert. Ein prinzipielles Limit für den in (2.4) beschriebenen Mechanismus existiert nicht. Die Scanfrequenz kann also höher gewählt werden; folglich erhält man weitaus höhere Bildraten. Des weiteren eröffnen sich vor allem dadurch völlig neue Anwendungsmöglichkeiten (siehe 2.7). Die Mehrfachanordnung von Kollektionsglasfasern (Abb. 2 (6), (7)) ist für diese Art des Feedbacks von großem Vorteil. Einerseits erlaubt sie, die reflektierte Intensität von mehreren verschiedenen Winkeln α zu messen, was abhängig von der Oberflächenstruktur des Samples von Bedeutung ist. Andererseits ist diese Art der Kollektion des Lichtes weitaus kostengünstiger als die mit extrem aufwendigen Linsensystemen.

Anwendbarkeit

Diese Erfindung läßt es zu, optische Mikroskope zu konstruieren, deren Auflösungsvermögen im Bereich von ca. 10–50 nm liegt, im Gegensatz zu 1 µm bei konventionellen optischen Mikroskopen.

Das Anwendungsspektrum ist somit sehr breit. Wegen des hohen räumlichen und spektralen Auflösungsvermögens eignen sich solche Mikroskope besonders für Untersuchungen in der Biologie und in der Halbleiterforschung insbesondere für optoelektronische Bauelemente.

Eine besondere Ausführungsart der Erfindung ist (Abb. 4, Abb. 5):
(Magneto-Optische Datenspeicher: siehe Scientific American, August 1995; S.31)

Verwendet man als Sample eine magneto-optisch aktive Oberfläche, so ist es auf Grund der hohen Geschwindigkeit des Feedbacks möglich, Daten zu lesen und zu speichern und zwar mit einer weitaus höheren Kompressionsdichte als mit konventionellen magneto-optischen Speichersystemen.

Mechanischer Aufbau (Abb. 4)

Eine magneto-optisch aktive Scheibe (1) wird von einer Halterung (2) in Rotation versetzt. Ein 1-dimensionales Positionierungssystem (3) bewegt den Kopf (4) exakt parallel zur x-Achse auf einer Strecke vom Mittelpunkt der Scheibe (1) bis zum Rand der selben. Der Kopf (4) selber hat ein 2-dimensionales Feinpositionierungssystem in Richtung der x- und y-Achse, mit dem der Abstand der Glasfaserspitze (5) zur Oberfläche der Scheibe entlang der y-Achse mit einer Präzision im nm-Bereich verändert werden kann. Gleichzeitig wird der Fehler der Translation des 1-dimensionalen Positionierungssystems (3) parallel zur x-Achse ebenfalls bis in den um-Bereich korrigiert. Technisch läßt sich dies ebenfalls mit Hilfe von piezoelektrisch aktiven Kristallen realisieren.

Schematischer Aufbau und Funktionsweise (Abb. 5)

Der Grundgedanke ist, dem konventionellen magneto-optischen Laufwerk ein zweites System hinzuzufügen, das komplett unabhängig vom ersten funktioniert. Das konventionelle System funktioniert im Großen folgendermaßen:

Der Kontrollelektronik (1), steuert zum einen mit dem Ausgangssignalen x_1 die Translation des 1-dimensionalen Positionierungssystems (Abb. 4, (3)), zum anderen mit den Ausgangssignalen o_1 -on verschiedene Parameter wie z. B. die Rotationsfrequenz des Drehmotors, auf dem die Halterung (Abb. 4, (2)) befestigt ist; die Intensität des Lasers 1 usw... Gleichzeitig erhält (1) neben dem Intensitätssignal (Abb. 5, (7)) der Photodiode verschiedene andere Kontrollsiegel i_1 – i_k . Lese- und Schreibvorgänge werden gesteuert von (1) mit Hilfe des Lasers 1 und des Ausgangssignal (Abb. 5, (7)) der Photodiode 1, die von der Scheibenoberfläche reflektiertes Laserlicht über einen optischen Filter 1 und ein optisches System erhält.

Das hinzugefügte zweite System, für das der Patentschutz beantragt wird, besteht aus der Kontrollelektronik (2) mit Verstärker, einem Laser 2 mit der Wellenlänge λ_2 , einem Glasfasermultiplexer, dem Kopf (Abb. 4, (4)) und einem 2. Detektorsystem. Der Glasfasermultiplexer koppelt das Licht der beiden Laser 1 und 2 mit der jeweiligen Wellenlänge λ_1 und λ_2 der beiden Glasfa-

sern (3) in eine einzelne Glasfaser (Abb. 5, (4)) bzw. (Abb. 4, (5)).

Die Photodioden 1 und 2 erhalten über die Kollektionsglasfasern (Abb. 4, (6)), (Abb. 5, (5)) von der Oberfläche der Disc (Abb. 4, (1)) reflektiertes Licht. Aus nachfolgenden Gründen erhält jede Photodiode noch einen entsprechenden optischen Filter.

Die Kontrollelektronik (1) steuert die mit den Signalen (xx1) und (xx2) die Position des Feinpositionierungssystems (Abb. 4, (4)) parallel zur x-Achse. Der Feedback, der einen konstanten Abstand der Glasfaserspitze garantieren soll, ist in der Kontrollelektronik (1) integriert und kann aus einem digitalen oder analogen Schaltkreis bestehen. (1) vergleicht dabei das Ausgangssignal der Photodiode (Abb. 5, (6)) mit einem definierten Referenzwert und korrigiert mit Hilfe des Ausgangssignals (y1) die y-Position des Feinpositionierungssystems (Abb. 4 (4)). So wird also dafür gesorgt, daß die Glasfaserspitze den Nahfeldinterferenzbereich nicht verläßt. Durch einen einfachen Trick lassen sich die beiden Systeme voneinander entkoppeln. Filter 1 sorgt dafür, daß nur Licht der Wellenlänge λ_1 zur Photodiode 1 gelangt. Filter 2 läßt nur Licht von Laser 2 der Wellenlänge λ_2 zur 2. Photodiode. Beide Systeme können demzufolge unabhängig voneinander arbeiten.

Anwendbarkeit

Magneto-Optical Discs haben momentan eine Speicherkapazität von ca. 1 GB. Ein Bit benötigt dabei die Fläche von $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$. Glasfaserspitzen von 20 nm Durchmesser können heute schon hergestellt werden. Rein theoretisch ließe sich somit die Speicherkapazität von optischen Speichermedien um den Faktor 50^2 auf ca. 2500 GB vergrößern.

Patentansprüche

1. Optisches Nah Feld Mikroskop (Scanning Near Field Optical Microscope — SNOM), das eine Lichtquelle zum Scannen verwendet und im Reflexionsmodus arbeitet, dadurch gekennzeichnet, daß ein optischer Nahfeldinterferenz-Feedback verwendet wird. In Kombination mit einer speziellen Anordnung von Glasfasern zur Kollektion des reflektierten Lichtes.
2. Identische Anordnung nach Patentanspruch (1) in Kombination mit einem magnetooptischen Datenspeicher zur Speicherung und zum Lesen von Daten.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

Abb. 1a:

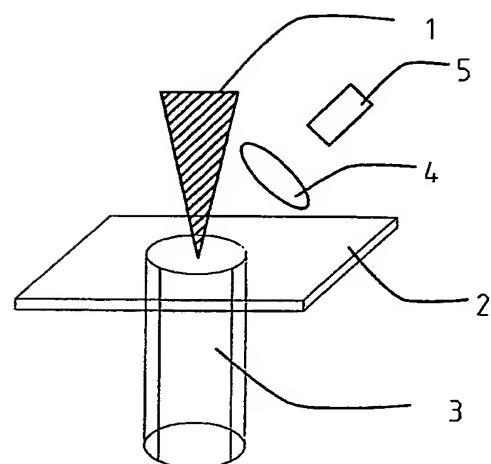


Abb. 1b:

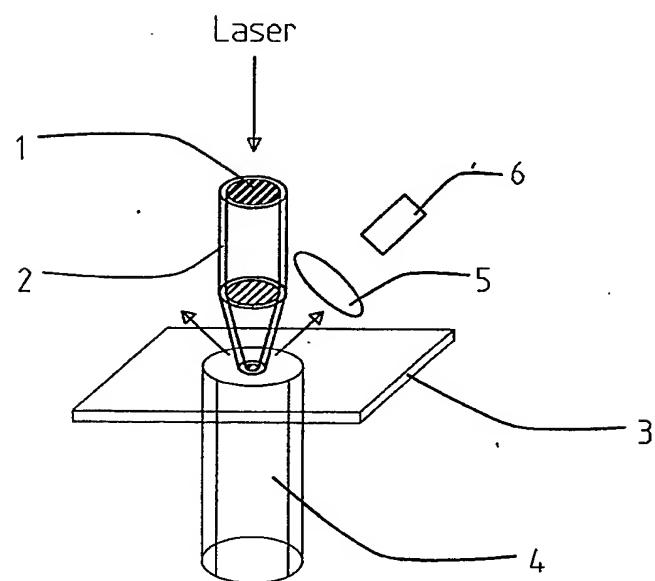


Abb.: 2

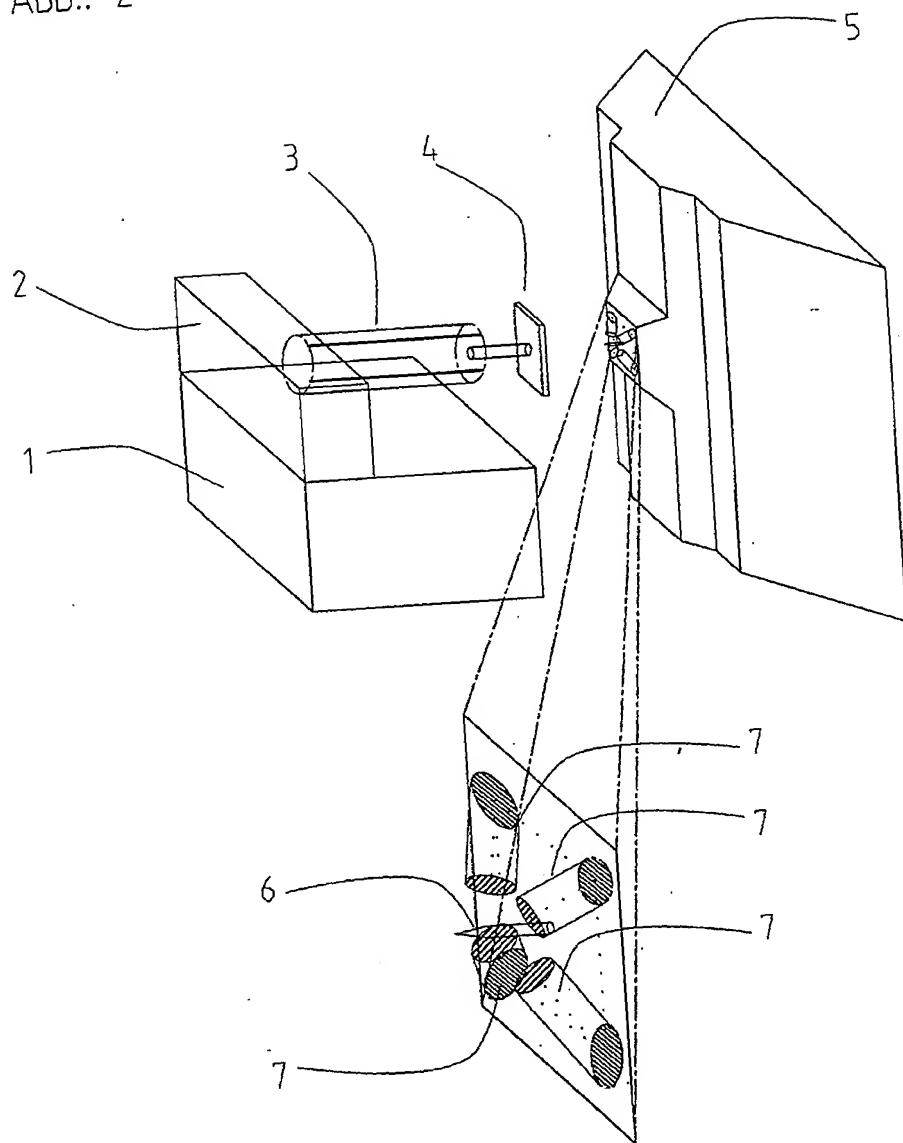


Abb.: 3

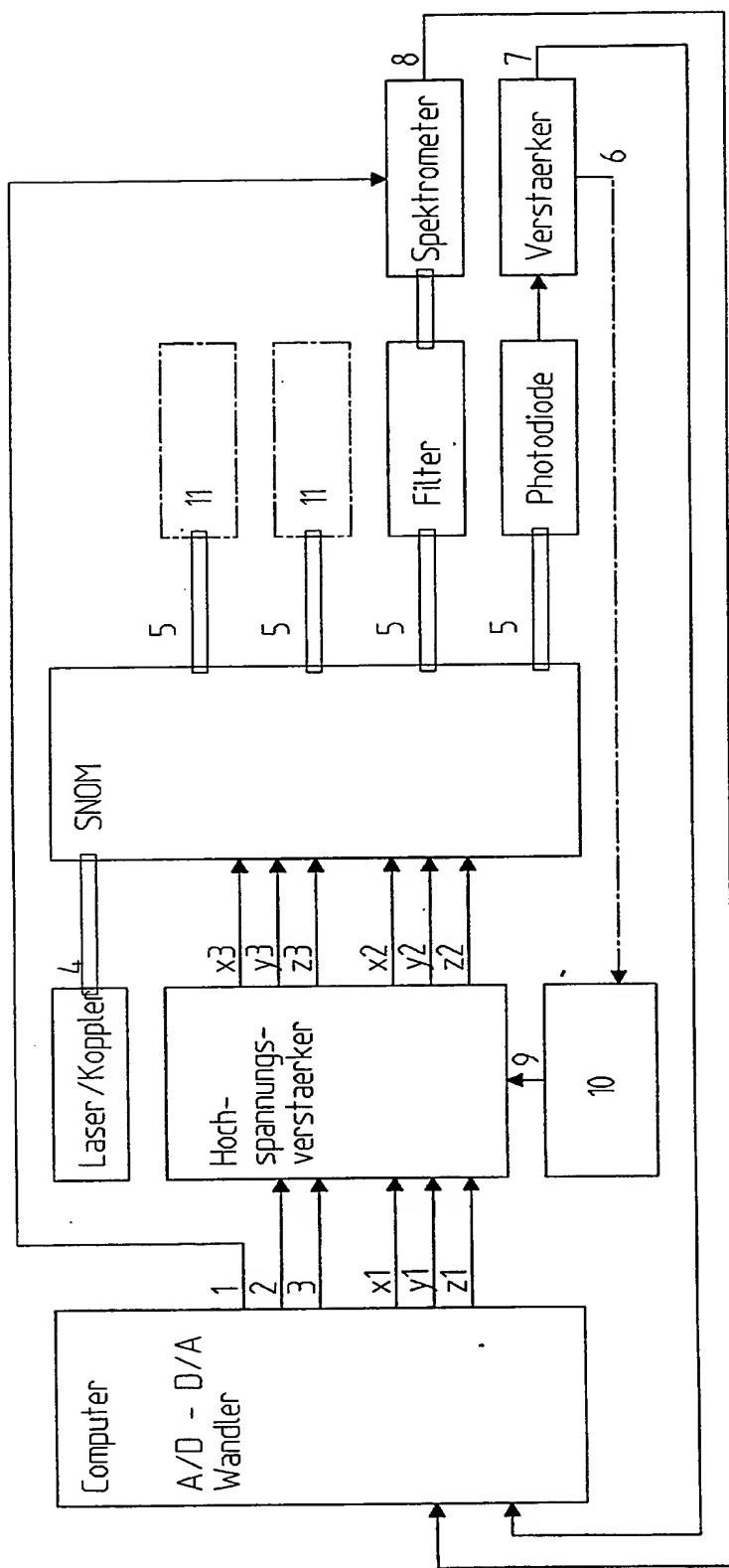
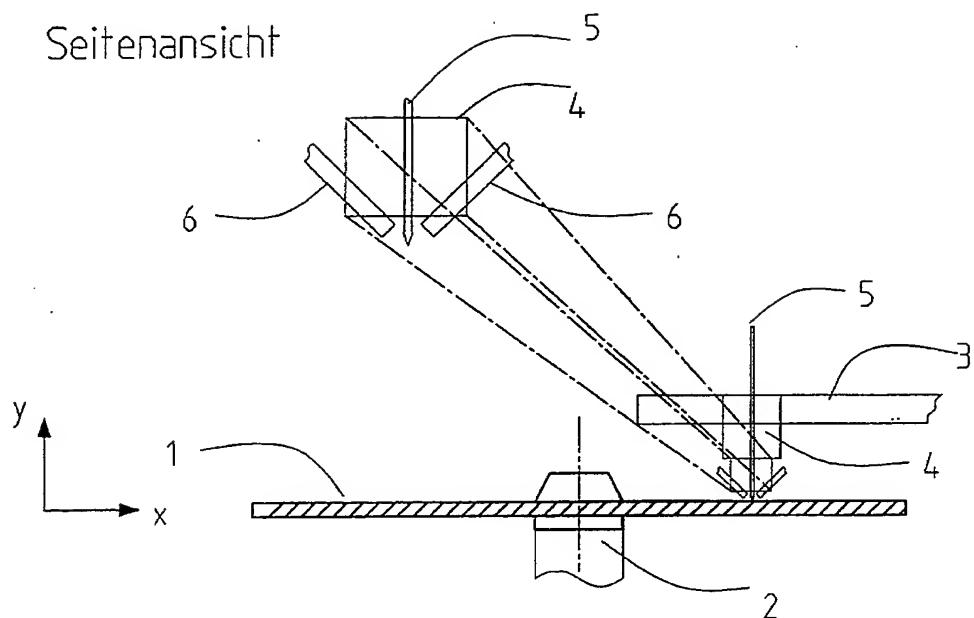


Abb.: 4
Seitenansicht



Draufsicht

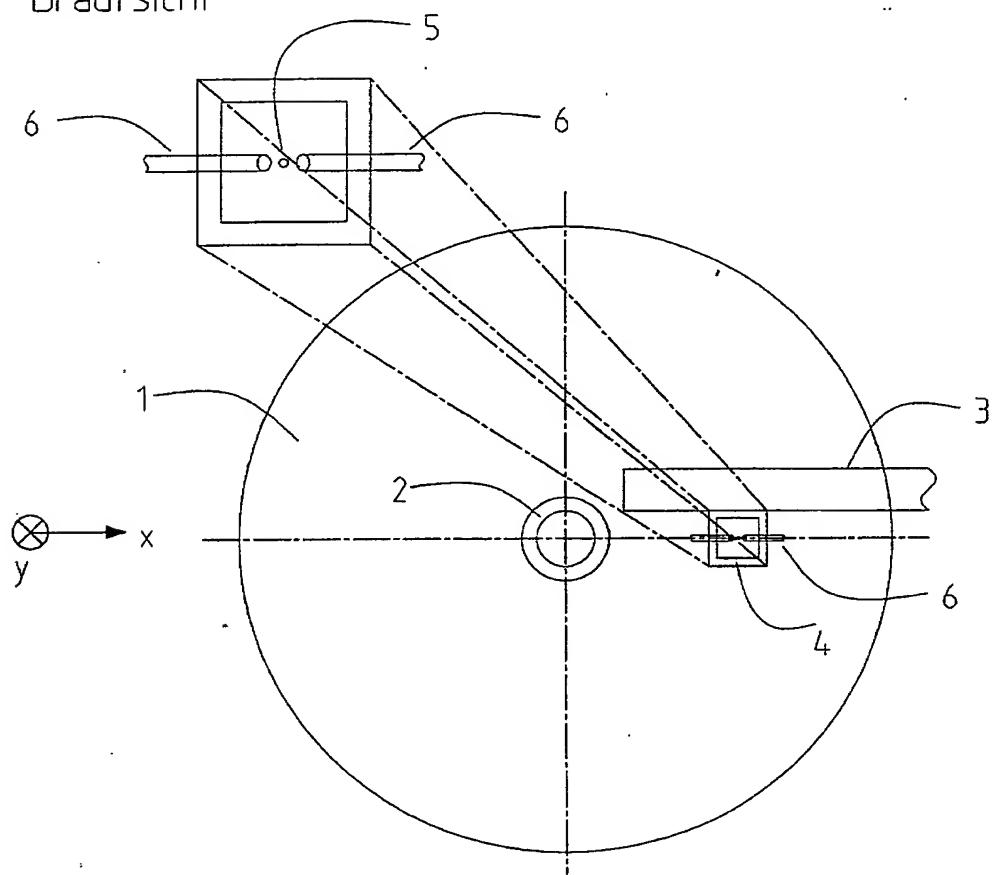


Abb. 5

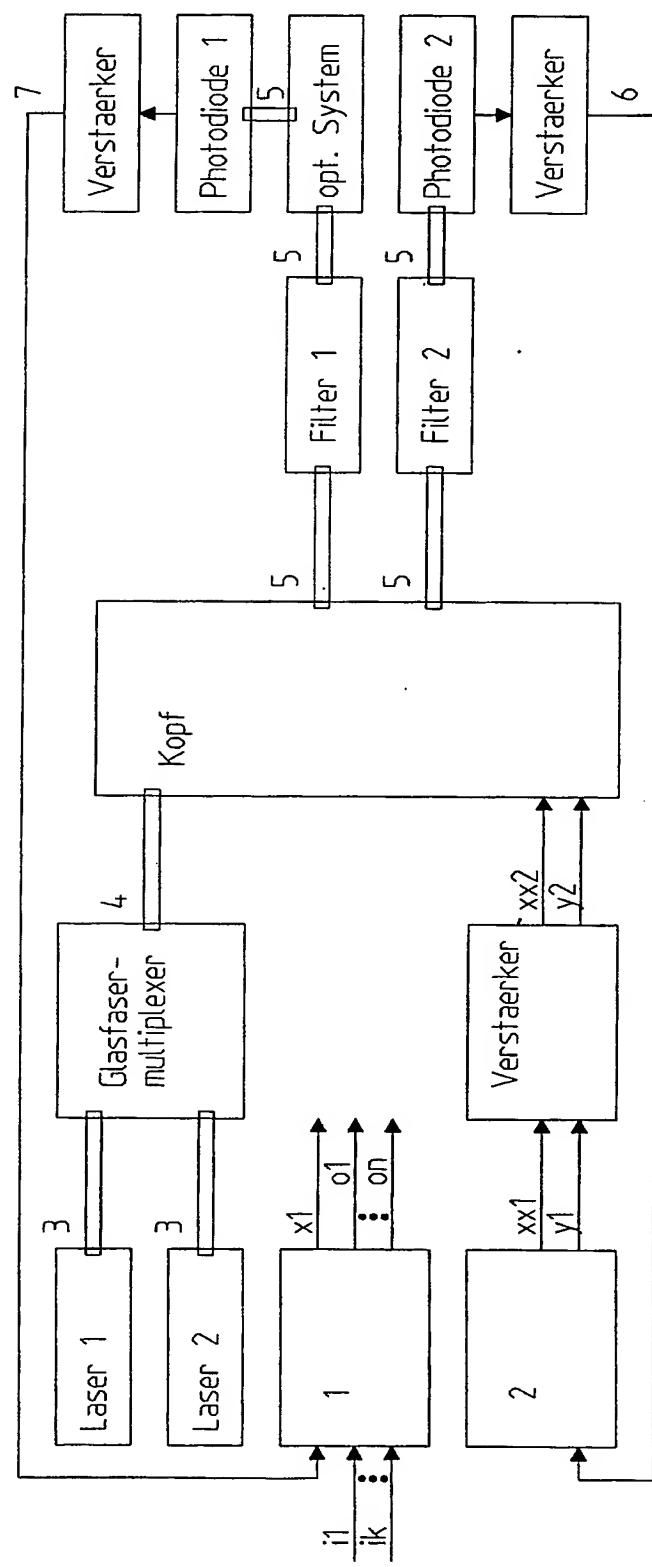


Abb. 6:

